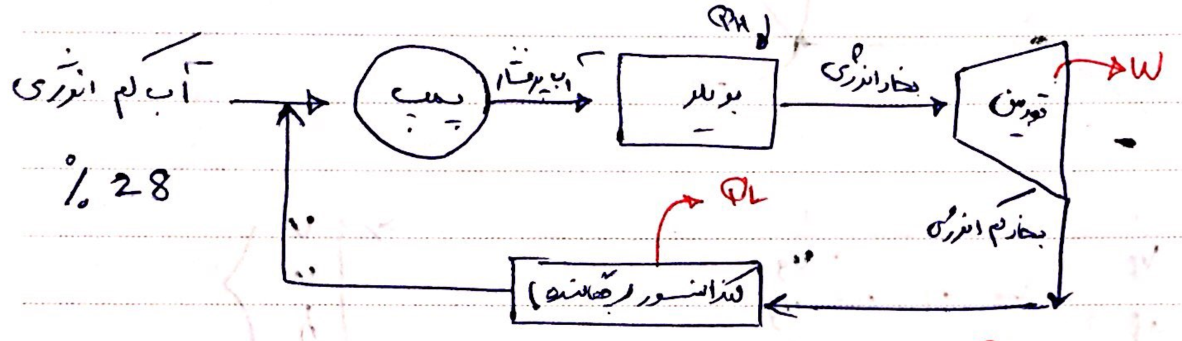
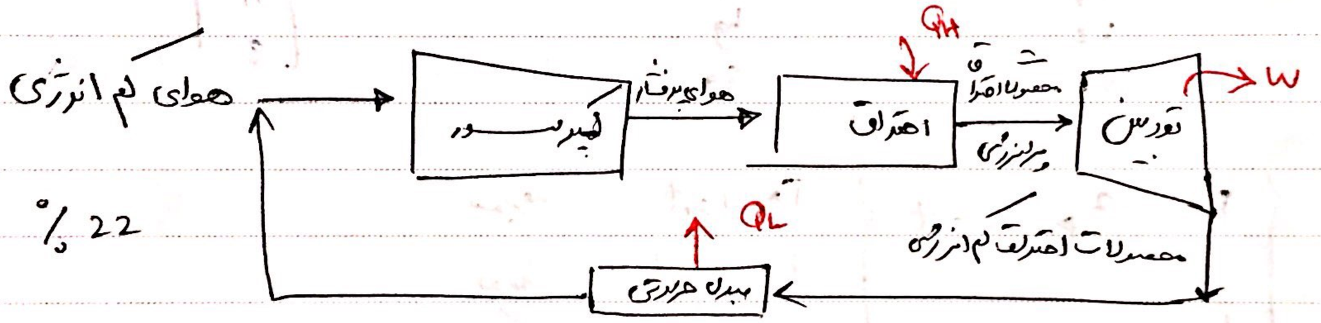
ترمودینامیک 2 _ استاد شیرین زاده

سیال :
1- آب ← تراکم ناپذیر (ماده خالص)
2 _ هوا ← تراکم پذیر (گازهای ایده آل)





مشخصه های سیال :

1- ماده خالص :

P فشار

T دما

v حجم مخصوص

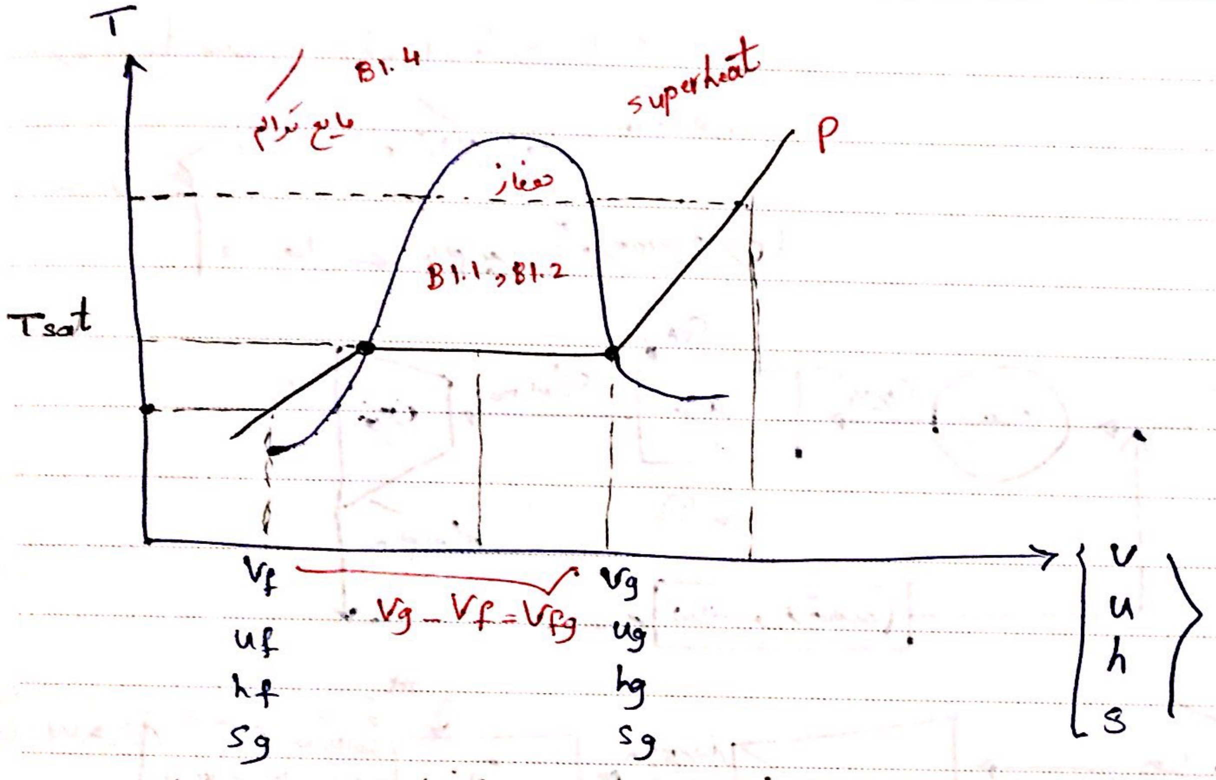
u انرژی درونی مخصوص

h آنتالپی مخصوص

s آنتروپی مخصوص

Scanned by CamScanner

Subject
Date



$P \xrightarrow{B1.2} T_{sat}$, T

- $T > T_{sat}$ سوپرهیت
- $T = T_{sat}$ دوفاز
- $T < T_{sat}$ مایع متراکم

$P \xrightarrow{B1.2} v_f \; v_g$, v

- $v < v_f$ مایع متراکم
- $v_f < v < v_g$ دوفاز
- $v > v_g$ سوپرهیت

T , v

$$v = v_f + x v_{fg}$$
$$u = u_f + x u_{fg}$$
$$s = s_f + x s_{fg}$$
$$h = h_f + x h_{fg}$$

PaPCO

Scanned by CamScanner

مشخصه گازهای ایده‌آل :

P, T, V → $PV = RT$

$PV = RT$

$u = \int c_v \, dT \xrightarrow{c_v \text{ ثابت}} C_v T$

$PV = mRT$

$h = \int c_p \, dT \xrightarrow{c_p \text{ ثابت}} c_p T$

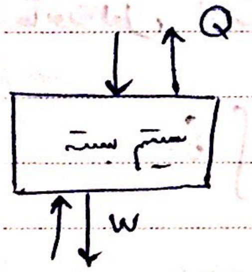
$PV = nRT$

$s = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

$P = \rho R T$

$c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$

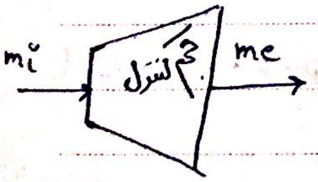
$v = \frac{V}{m}$ $\qquad n = \frac{m}{M}$ $\qquad \rho = \frac{m}{V}$



قانون اول ترمودینامیک یا (قانون انرژی)

$dE = \delta Q - \delta W = dU + d(KE) + d(PE)$

$KE = \frac{1}{2} m V^2$ $\qquad PE = mgZ$



$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i + P_i v_i \right)$ ($u_i + P_i v_i = h_i$)

$- \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e + P_e v_e \right)$ ($u_e + P_e v_e = h_e$)

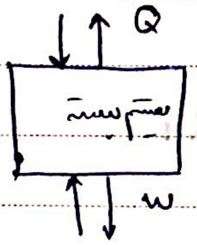
Scanned by CamScanner

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i\left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right) - \dot{m}_e\left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right)$$

$\Rightarrow$ پایا $= 0$

ناپایا $\neq 0$

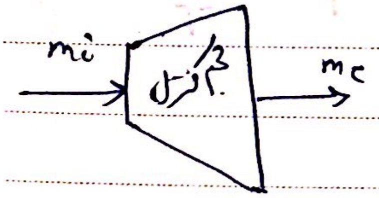
قانون دوم ترمودینامیک / قانون آنتروپی:



$$ds = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_g$$

$\delta S_g \rightarrow$
- برگشت‌پذیر $= 0$
- برگشت‌ناپذیر > 0

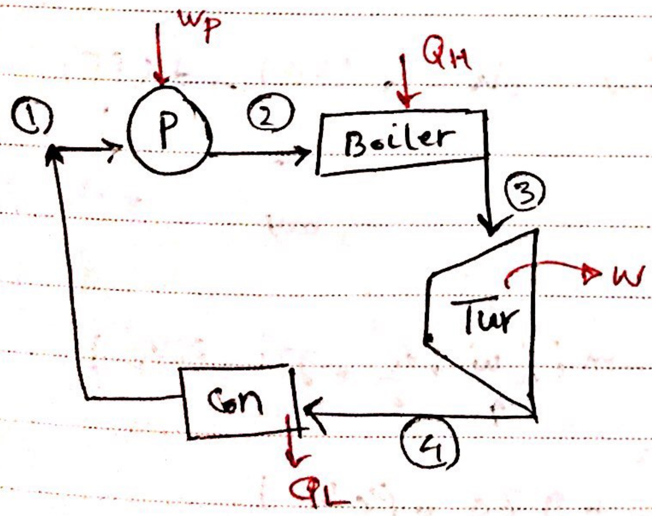
$\frac{\delta Q}{T}$:
- گرماگیر > 0
- گرماده < 0
- عایق $= 0$



$$\frac{ds}{dt} = \frac{\delta \dot{Q}}{T} + \delta \dot{S}_g + \dot{m}_i s_i - \dot{m}_e s_e$$

قانون اول از منظر سیکل می‌گوید انتگرال روی سطح بسته کار با انتگرال روی سطح بسته حرارت

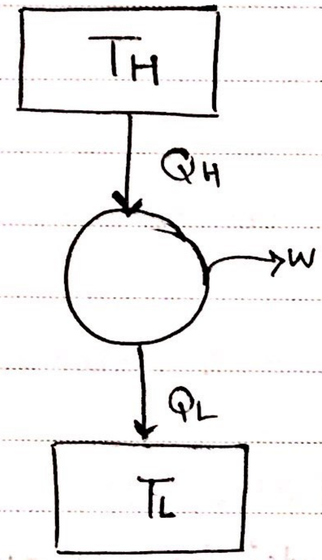
$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$



$$Q - W = \Delta U \Rightarrow Q = W$$

$$+Q_H - Q_L = -W_P + W_T = W_{net}$$

قانون دوم از نظر کلوین :



موتور حرارتی

$$\eta = \frac{w_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Turbine $\Rightarrow \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i(h_i) - \dot{m}_e(h_e)$

$$\begin{cases} 0 = 0 - \dot{W}_T + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 \\ \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad \text{پیوستگی} \end{cases} \Rightarrow w_1 = h_3 - h_4$$

Boiler $\Rightarrow \begin{cases} 0 = \dot{Q}_H - 0 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 \\ \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \end{cases} \Rightarrow q_H = h_3 - h_2$

Con $\Rightarrow \begin{cases} 0 = -Q_L - 0 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_1 h_1 \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_4 \end{cases} \Rightarrow 0 = -Q_L + h_4 - h_1$

$$Q_L = h_4 - h_1$$

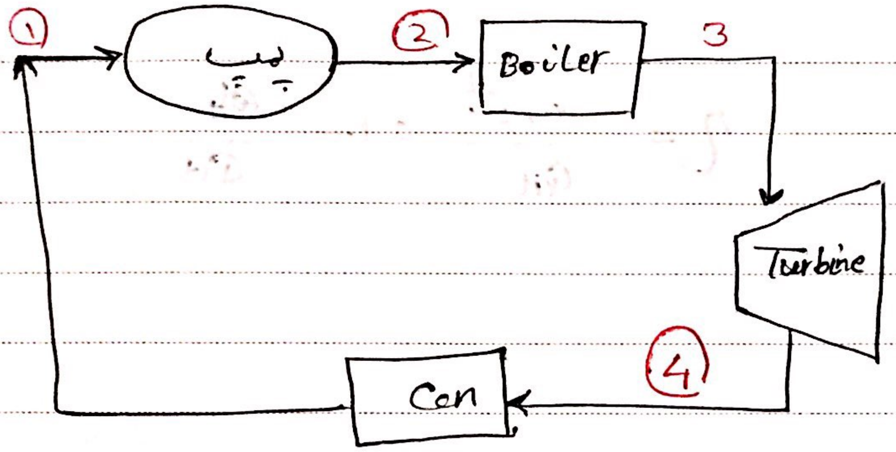
Pump $\begin{cases} 0 = 0 - (-w_p) + \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \end{cases} \Rightarrow 0 = +w_p + h_1 - h_2$

$$w_p = h_2 - h_1$$

PAPCO

Scanned by CamScanner

نیروگاه واقعی را نمی شود بررسی کرد چون برای نقطه 2، h های مختلفی بدست می آید.



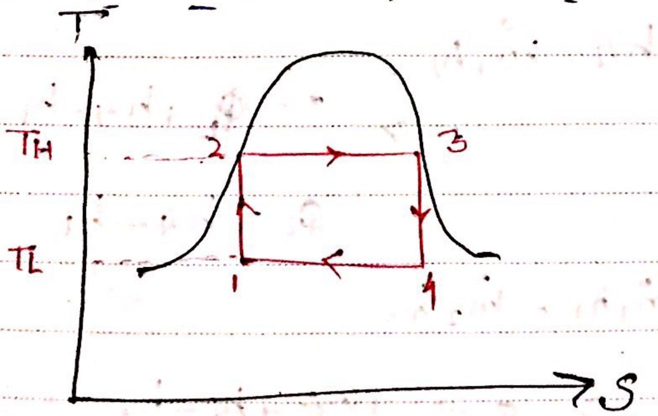
1- لوله ها به خوبی عایق شده اند (افت دمایی نداریم) 2- اصطکاک در لوله ها وجود ندارد (افت فشار نداریم)

3- از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می کنیم.

تجربه نشان می دهد راه های افزایش راندمان سیکل ایده آل، راه های افزایش راندمان سیکل واقعی نیز است.

خصوصیات سیکل کارنو

1- همیشه دو فاز کار می کند 2- دو فرآیند دما ثابت و دو فرآیند آیزونتروپیک (آنتروپی ثابت) دارد



$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

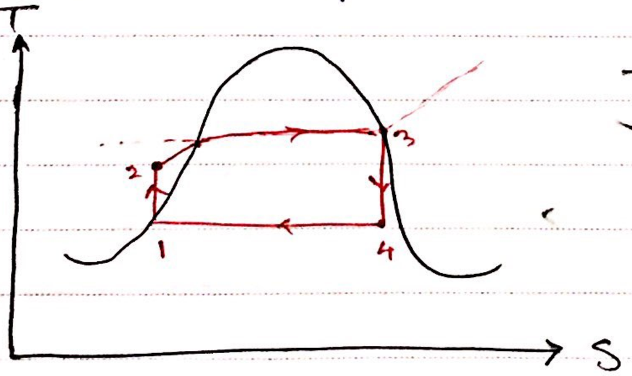
Scanned by CamScanner

مشکلات اصلی: دو مشکل اصلی کارنو :

الف) نقطه‌ی ۱ یک حالت دوفازی دارد. چون نقطه‌ی ① ورودی پمپ است، پمپ می‌سوزد

ب) فرآیند بویلر و کندانسور در کارنو دما ثابت می‌باشد، مطابق شکل اگر بخار در کندانسور به خوبی خنک شود ماکسیمم عمق آن $300\,K$ است. $(T_L = 300)$ و مطابق شکل فوق برای اینکه از حالت دوفازی بیرون نرویم، ماکسیمم خروجی بویلر برابر $374\,K$ $(T_H = 374)$ مطابق جدول زیر راندمان حدود 20% می‌شود جهت رفع این مشکل فرآیندهای دما ثابت را به فشار ثابت تبدیل می‌کنیم تا دمای T_H را به اندازه دلخواه بالا ببریم.

برای حل مشکل الف نقطه‌ی ① را به حالت مایع اشباع می‌بریم و برای رفع حل مشکل ب دو فرآیند دما ثابت یعنی بویلر و کندانسور را به فشار ثابت تبدیل می‌کنیم. مطابق شکل رانکین به وجود می‌آید.



T_H کارنو $<$ T_H رانکین

T_L کارنو $=$ T_L رانکین $\Longrightarrow$

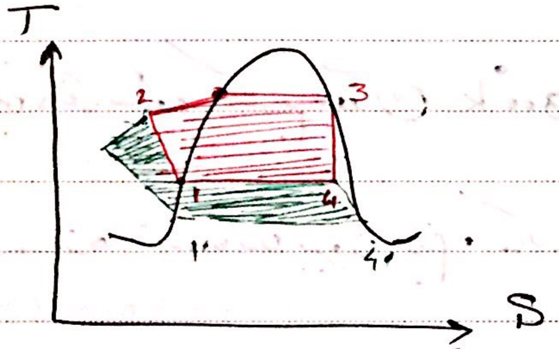
η کارنو $>$ η رانکین

Subject
Date

هدف افزایش راندمان سیکل رانکین بود.

۱_ کاهش فشار کندانسور

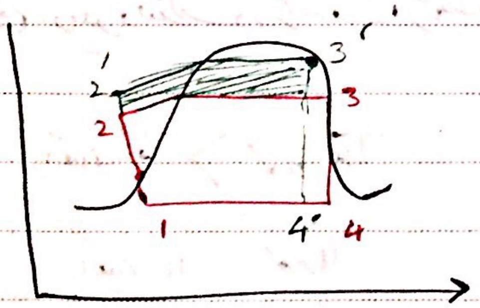
محدودیت ۱: تا جایی فشار کندانسور را کم می‌کنیم تا کیفیت نقطه 4' مطابق شکل از ۰٫۹ کمتر نشود به دلیل پدیده مخرب کاویتاسیون.



محدودیت 2: فشار را تا جایی کاهش می‌دهیم که نشتی از 5٪ بیشتر نشود.

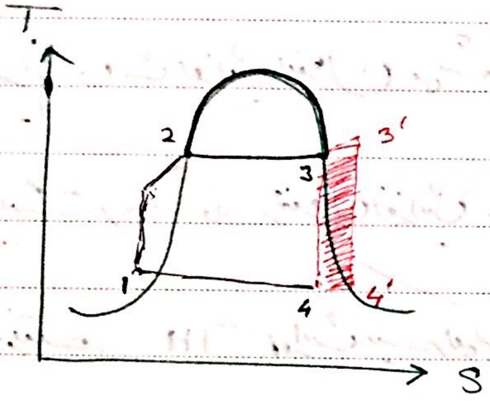
2_ افزایش فشار بویلر:

محدودیت: تا جایی فشار بویلر را زیاد می‌کنیم تا کیفیت نقطه 4' از ۰٫۹ کم‌تر نشود.



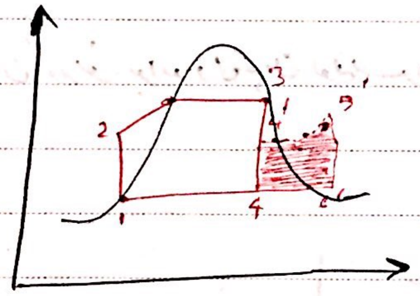
Subject
Date

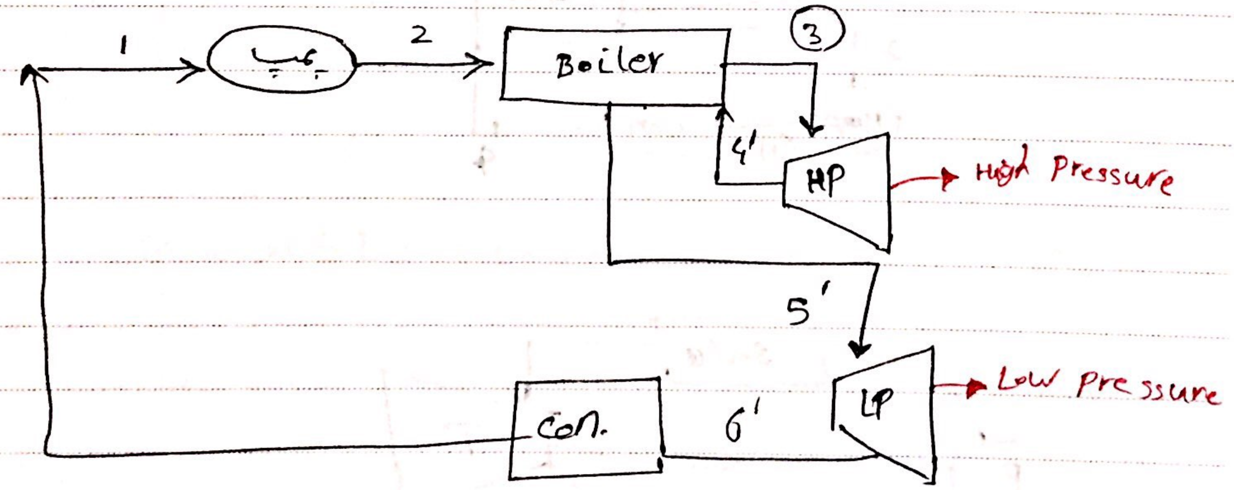
3 ـ مافوق گرم کردن خروجی بویلر : مشکل متالورژی دارد باید بتواند چنین دمایی را تحمل کند



ولی بهترین روش است کیفیت نقطه 4' را بیشتر می‌کند .

4 ـ روش گرمایش مجدد یا Reheated :





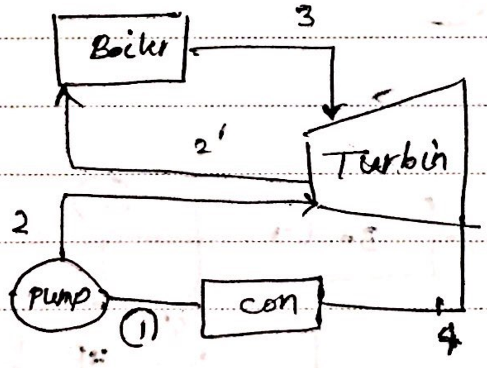
PAPCO

Subject
Date

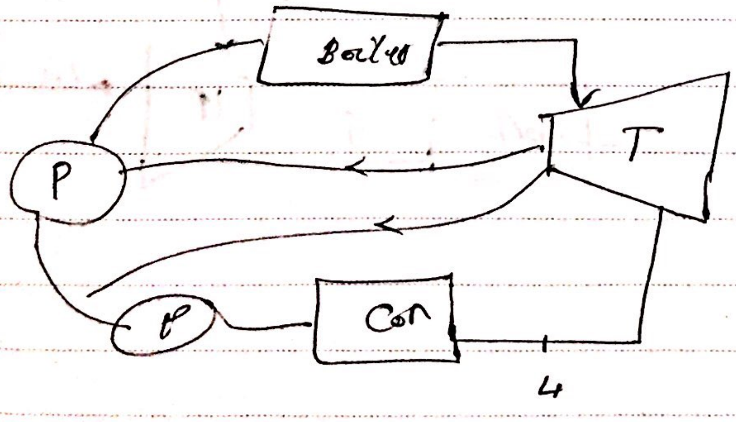
5- روش بازیاب : زمانی که به حرارت صفت داشتیم این حرارت را به یک نقطه ی دیگر از نیروگاه ببریم و باعث افزایش راندمان می شود. از توربین زیرکش میکنیم به نقطه ی 2 می بریم حرارت نقطه ی 2 بیشتر می شود راندمان افزایش پیدا می کند و نقطه 2 به نقطه 2' انتقال پیدا می کند در نتیجه TH افزایش پیدا می کند و راندمان افزایش پیدا می کند.

الف) لوله از داخل توربین رد شود

راندمان با راندمان کارنو برابر ولی چون لوله سرد از توربین رد شد پدیده کاویتاسیون به وجود می آید.



ب)

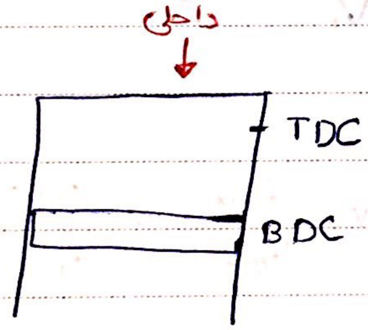


Subject
Date

$P_2 = P_5 = P_{2'}$

سیال عامل هوا : دو حالت وجود دارد : ۱- موتور احتراق داخلی (مثل موتورهای بنزینی) در این موتورها احتراق و انبساط (کار) در یک مکان (درون سیلندر) انجام می‌شود .

2 - موتور احتراق خارجی (مثل نیروگاه گازی) احتراق و انبساط در دو مکان متفاوت (احتراق در محفظه احتراق و انبساط در توربین) انجام می‌شود .



موتور احتراق داخلی : ۱- موتور اشتعال جرقه‌ای (SI) بنزینی یا اتو

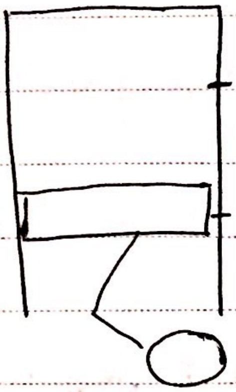
2 - موتور اشتعال تراکمی (CI) دیزلی

Scanned by CamScanner

Subject

Date

موتور اشتعال جرقه‌ای یا اتو :



BDC / TDC

1 $\xrightarrow{\text{تراکم}}$ 2 آیزنتروپیک
ایزنتروپیک

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1}$$

TDC → TDC

Q_H 2 $\xrightarrow{\text{احتراق}}$ 3 $\qquad V_2 = V_3$

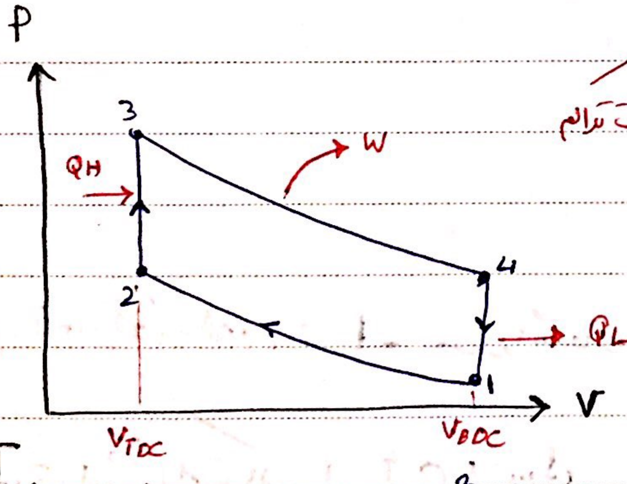
TDC → BDC

W 3 $\xrightarrow{\text{انبساط}}$ 4 ایزنتروپیک

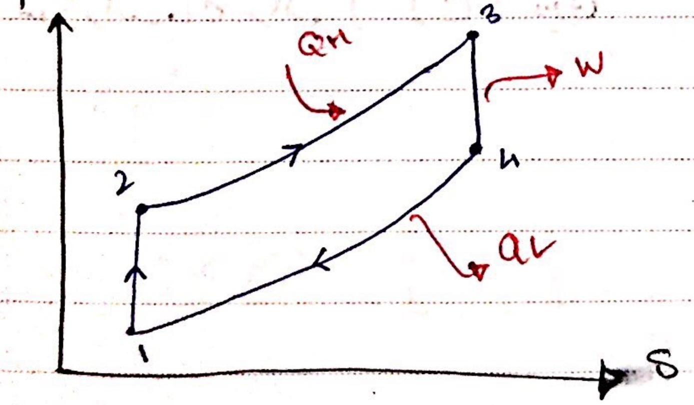
$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{K-1}$$

BDC → BDC

Q_L 4 → 1 $\xrightarrow{\text{تخلیه}}$ $\qquad V_4 = V_1$



$$\text{نسبت تراکم } r_V = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$



Scanned by CamScanner

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$Q - W = \Delta U \rightarrow -Q_L - 0 = C_v (T_1 - T_4)$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = 1 - \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{1}{r_v^{(k-1)}}$$

برای افزایش راندمان اتو می‌بایست r_v را افزایش دهیم. طبق فرمول $r_v = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$ با افزایش V_{BDC} و کاهش V_{TDC} می‌توان نسبت تراکم را افزایش داد. افزایش V_{BDC} به افزایش حجم موتور می‌انجامد که دست طراح است.

کاهش V_{TDC} (بیش از حد) می‌تواند باعث افزایش دما به دمای بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت بیانجامد و این امر باعث خود اشتعالی سوخت در تمام نقاط می‌شود، این عمل باعث موج‌های فشاری در سیلندر شده (پدیده کوبش) است.

در نتیجه V_{TDC} را تا جایی کم می‌کنیم که پدیده کوبش رخ ندهد.

PAPCO

Scanned by CamScanner

موتور اشتعال تراکمی یا دیزل : در موتور دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا فقط هوا فشرده می‌شود و نیازی به جرقه ندارد.

فرآیند احتراق در دیزل فشار ثابت می‌باشد.

BDC → TDC

1 —تراکم→ 2 آنتروپی ثابت / ایزنتروپیک

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

TDC

Q_H → 2 —احتراق→ 3

$$P_2 = P_3$$

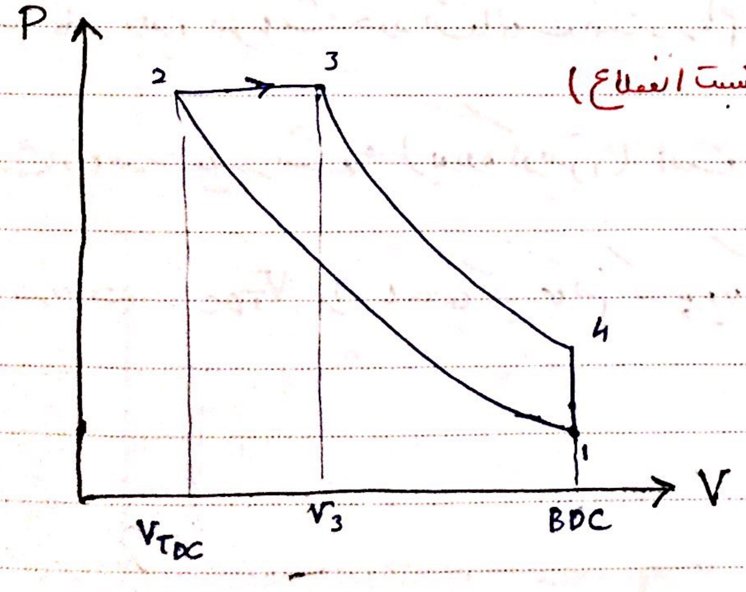
W_{out} ← 3 → 4 (BDC) آنتروپی ثابت / ایزنتروپیک

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1}$$

BDC → BDC

4 —تخلیه→ 1 , Q_L

$$V_4 = V_1 = V_{BDC}$$



(نسبت انقطاع) $V_c = \frac{V_3}{V_2}$

Subject
Date

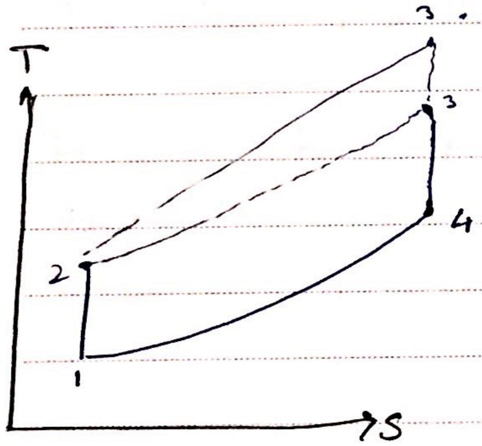
$$Q - W = \Delta U \rightarrow Q_H - PV = \Delta U$$

$$Q = \Delta H = C_P(T_3 - T_2)$$

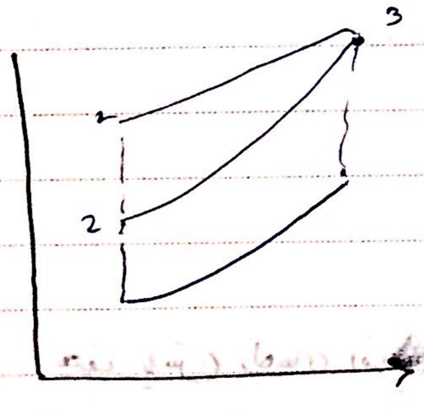
$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{r_c^{k} - 1}{k(r_c - 1)\, r_v^{k-1}}$$

مقایسه دیزل و اتو :

اگر $r_c = 1$ راندمان دیزل با اتو برابر می‌شود .



$\eta_{\text{اتو}} > \eta_{\text{دیزل}}$



$\eta_{\text{دیزل}} > \eta_{\text{اتو}}$

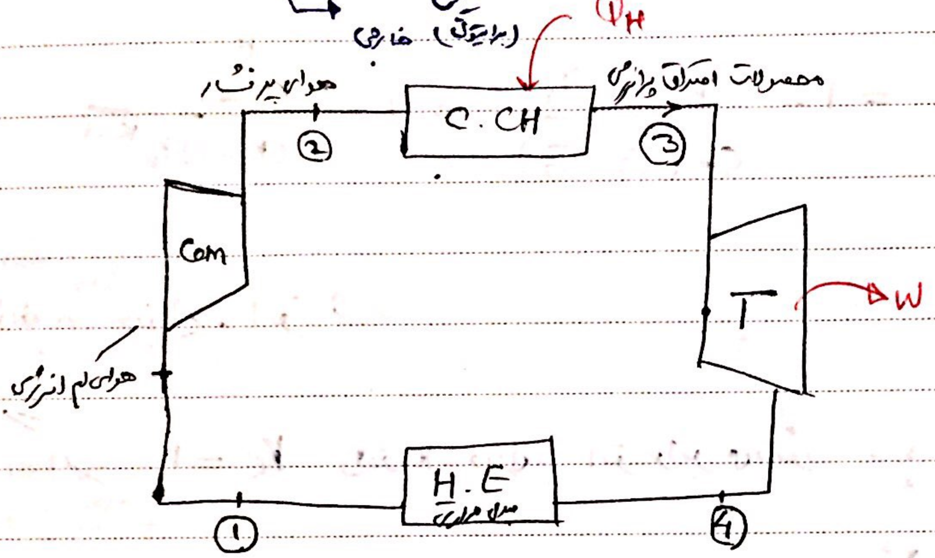
P4PCO

Scanned by CamScanner

Subject
Date

موتورهای احتراق خارجی :

سیال
- آب → رانکین
- هوا → داخلی (اتو، دیزل)
- هوا → خارجی (برایتون)



برایتون

1 —کمپرسور→ 2 آنتروپی ثابت

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1}$$

2 —احتراق→ 3 $\quad P_2 = P_3$

3 —توربین→ 4 $\quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{K-1}$

4 → 1 $\quad P_4 = P_1$

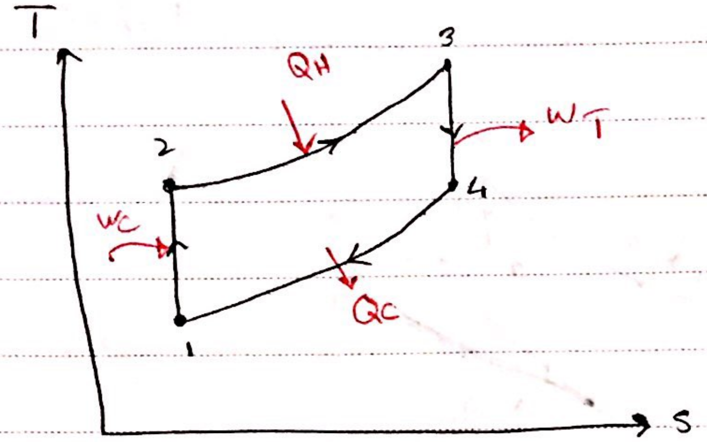
هدف یافتن راه‌های افزایش راندمان سیکل برایتون است.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{W_T - W_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

PAPCO

Scanned by CamScanner

Subject
Date



$$q_H = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

$$w_T = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4)$$

$$q_L = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1)$$

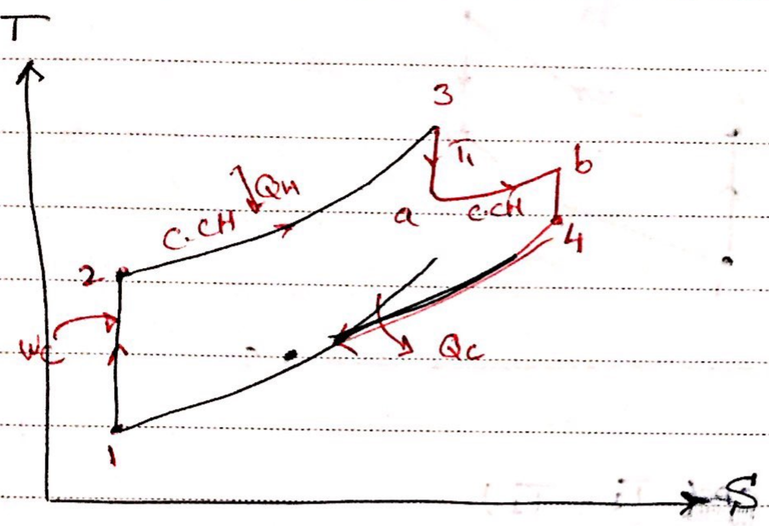
$$w_c = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

راه‌های افزایش راندمان سیکل برایتون :

۱ ـ کاهش افت تبدیل حرارتی 2 ـ افزایش فشار محفظه‌ی احتراق

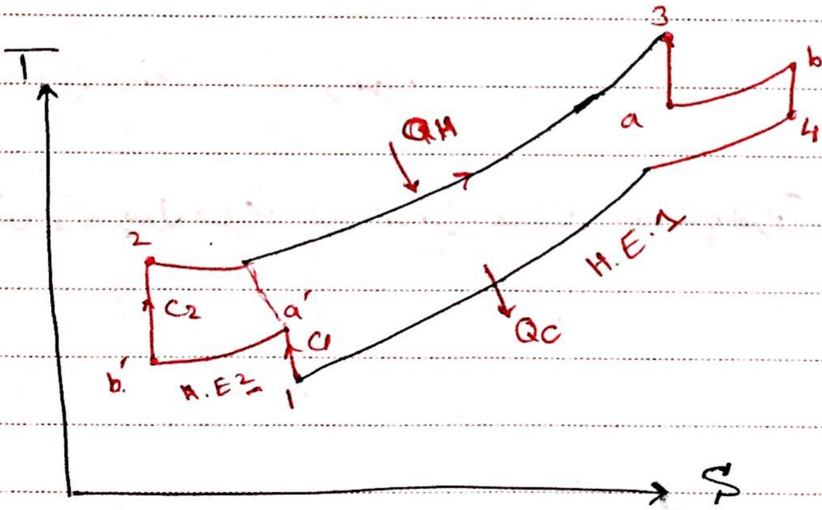
Scanned by CamScanner

گرمایش مجدد یا : Reheat



$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\overset{W_{T_1}}{(h_3 - h_a)} + \overset{W_{T_2}}{(h_b - h_4)} - (h_2 - h_1)}{\underset{C.CH_1}{(h_3 - h_2)} + \underset{C.CH_2}{(h_b - h_a)}}$$

اینترکولر یا سرمایش میانی و (Enter cooler):



$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{(h_3 - h_4) + (h_b - h_4) - (h_{a'} - h_1) - (h_2 - h_{b'})}{(h_3 - h_2) + (h_b - h_a)}$$

Subject

Date

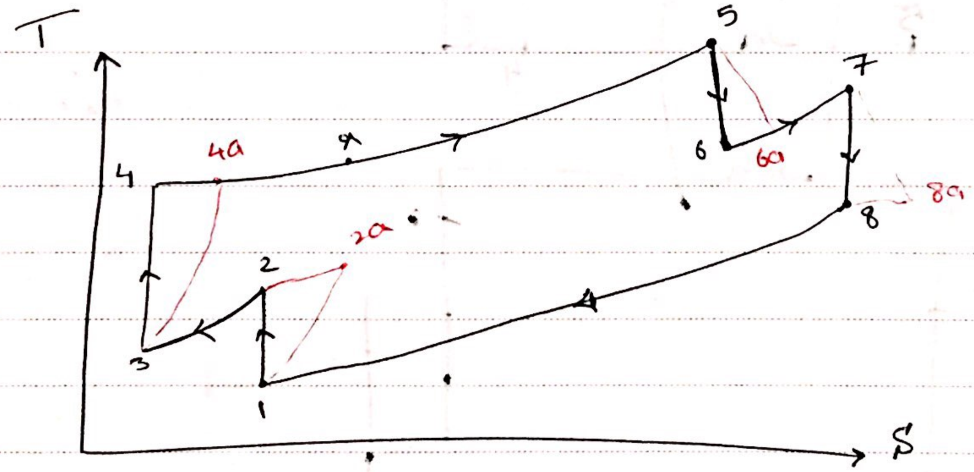
بازیاب: خروجی آخرین توربین را به خروجی آخرین کمپرسور می‌زنیم به این عمل بازیاب گفته می‌شود

در توربین گاز بدون بازیاب محفظه‌ی احتراق دما را از 2 به 3 می‌رساند ولی با بازیاب 2 تا x

وظیفه هیتر پیش ولی x تا 3 وظیفه محفظه‌ی احتراق دوم است.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{(h_3-h_4)+(h_6-h_4)-(h_{a'}-h_1)-(h_2-h_{b'})}{(h_3-h_x)+(h_6-h_a)}$$

$$\eta = \frac{h_2-h_x}{h_2-h_4}$$



$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{(h_5-h_{6a})+(h_7-h_{8a})-(h_{2a}-h_1)-(h_{4a}-h_3)}{(h_5-h_x)+(h_7-h_{6a})}$$

$$\eta = \frac{h_4-h_x}{h_4-h_8}$$

PAPCO

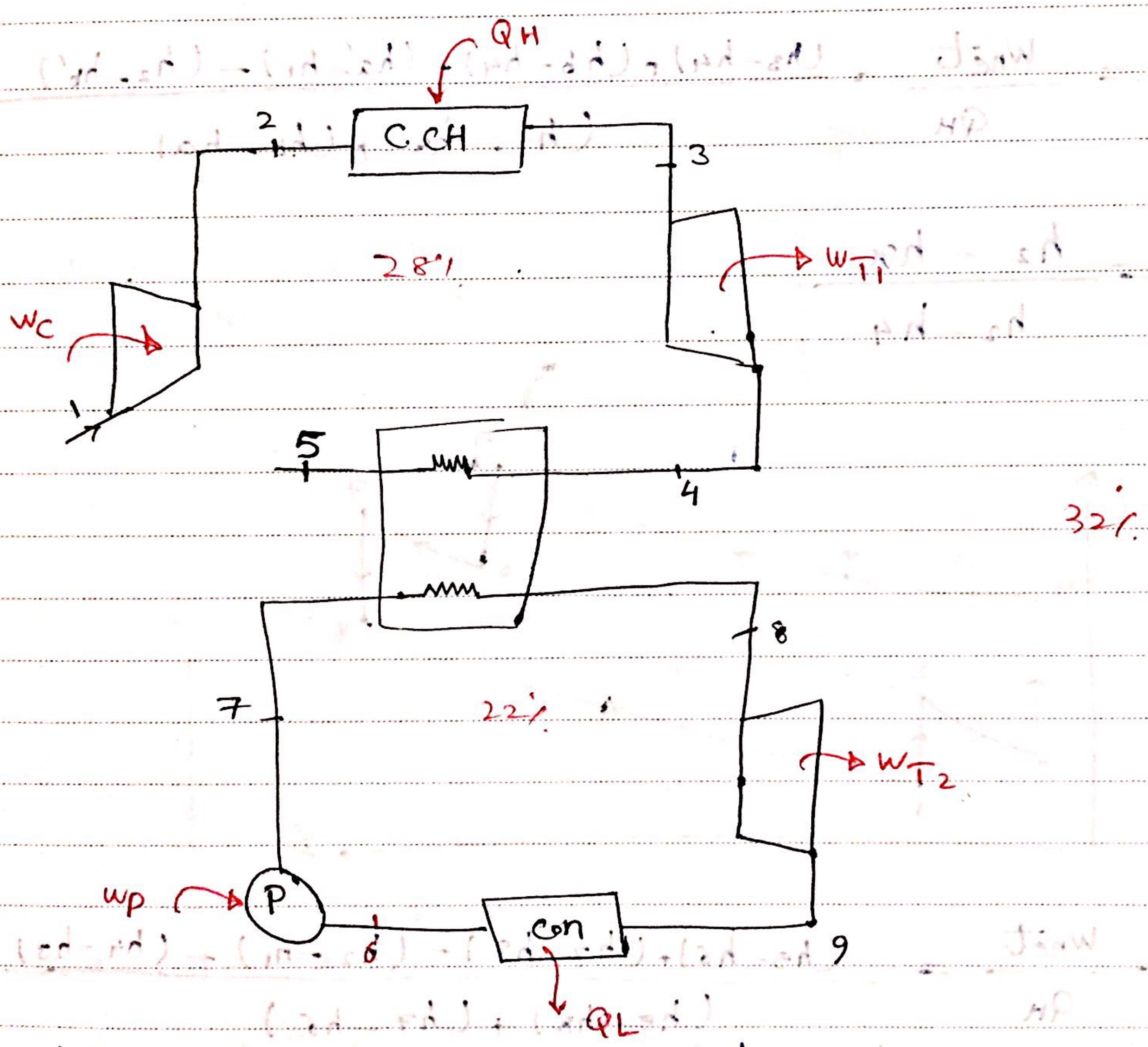
Scanned by CamScanner

Subject

Date

$$\eta_{c_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2a}} \qquad \eta_{T_1} = \frac{h_5 - h_{6a}}{h_5 - h_6}$$

$$\eta_{c_2} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4a}} \qquad \eta_{T_2} = \frac{h_7 - h_{8a}}{h_7 - h_8}$$



$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e$$

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_{air}(h_4 - h_5) + \dot{m}_w(h_7 - h_8)$$

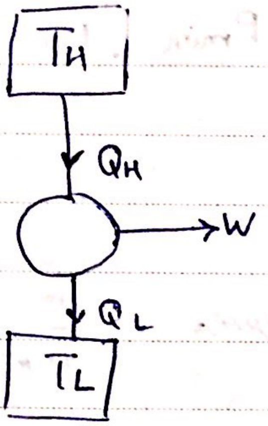
$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{T_1} + \dot{W}_{T_2} - \dot{W}_{P_1} - \dot{W}_{c_1}$$

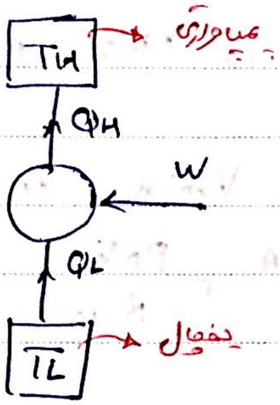
PAPCO

Scanned by CamScanner

Subject
Date

تبرید :

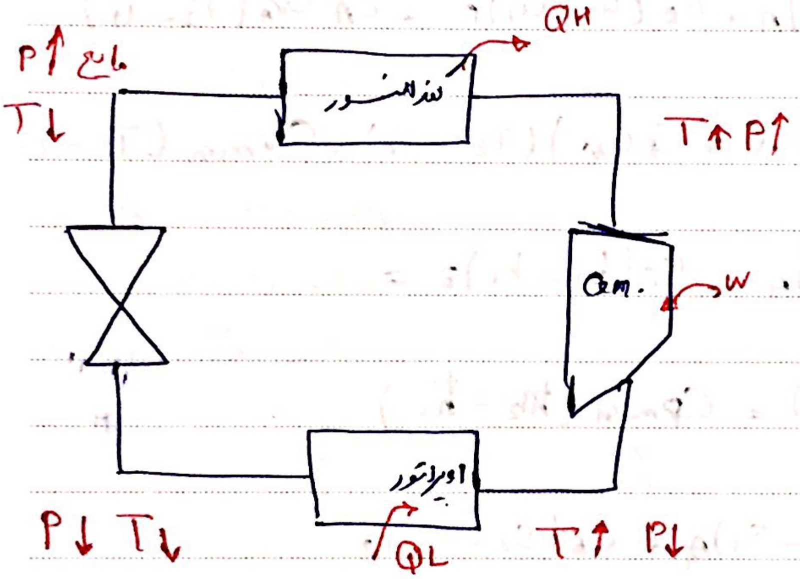


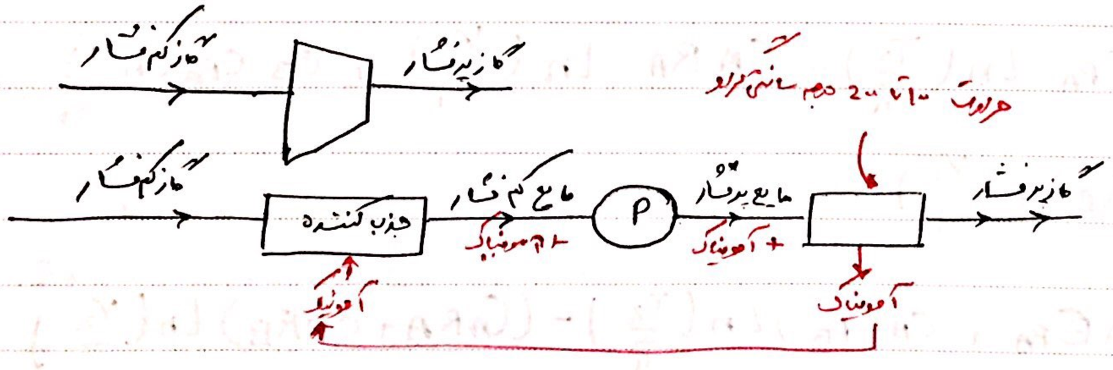


$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$\beta = \frac{Q_L}{W}$$ ضریب عملکرد یخچال

$$\beta' = \frac{Q_H}{W}$$ پمپ حرارتی





A	B
P_A	P_B
T_A	T_B
m_A	m_B
n_A	n_B
V_A	V_B

$$PV = RT$$

$$PV = mRT$$

$$PV = n\bar{R}T$$

Scanned by CamScanner

Subject
Date

$T_{mix} = T_A = T_B \quad , \quad n_{mix} = n_A + n_B \quad , \quad P_{mix} = P_A + P_B$

$m_{mix} = m_A + m_B \qquad V_{mix} = V_A = V_B$

$$\frac{P_{mix} V_{mix}}{R T_{mix}} = \frac{P_A V_A}{R T_A} + \frac{P_B V_B}{R T_B}$$

درصدجرمی $= \dfrac{m_i}{m_{mix}} = C_i$

$$(u_2 - u_1)_{mix} = C_A (u_2 - u_1)_A + C_B (u_2 - u_1)_B = C_A C_{v_A} (T_2 - T_1)$$

$$+ C_B C_{v_A} (T_2 - T_1) = (C_A C_v + C_B C_v)(T_2 - T_1) = C_{v_{mix}} (T_2 - T_1)$$

$$(h_2 - h_1)_{mix} = C_A (h_2 - h_1)_A + C_B (h_2 - h_1)_B =$$

$$(C_A C_v + C_B C_v)(T_2 - T_1) = C_{p_{mix}} (T_2 - T_1)$$

$$(S_2 - S_1)_{mix} = C_A (S_2 - S_1)_A + C_B (S_2 - S_1)_B$$

$$= C_A C_{P_A} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - C_A R_A \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) + C_B C_{P_B} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$- C_B R_B \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$= (C_A C_{P_A} + C_B C_{P_B}) \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - (C_A R_A + C_B R_B) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

PAPCO

Scanned by CamScanner

Subject
Date

هوای خشک	+ بخار آب
P_a	P_v
T_a	T_v
m_a	m_v

T_{wb} دمای حباب تر

T_{db} دمای حباب خشک

100kpas

$$P_{کل} = P_a + P_v$$

$$T_{کل} = T_a = T_v = T_{db}$$

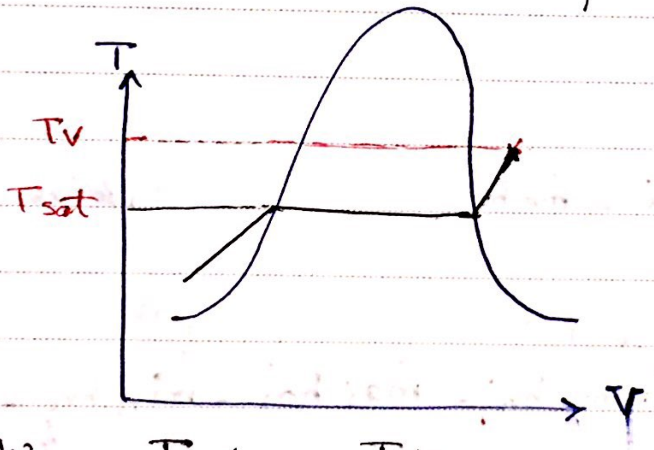
$$m_{کل} = m_a + m_v$$

$$n_{کل} = n_a + n_v$$

$$V_{کل} = V_a = V_b$$

$$P_a V_a = m_a R_{a} T$$

$$P V = n \bar{R} T$$



$P_v \xrightarrow{B1.2} T_{sat} = T_{dp}$ نقطه شبنم

$T_v \xrightarrow{B1.2} P_{sat} = P_g$ بیشترین رطوبتی که می‌تواند بگیرد

رطوبت نسبی $\phi = \frac{P_v}{P_g}$ نسبت رطوبت $\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0{,}622 \frac{P_v}{P_a}$

$$\frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{P_v V_v}{R_v T_v}}{\frac{P_a V_a}{R_a T_a}} = \frac{P_v}{P_a} \times \frac{R_a}{R_v} = 0{,}622 \frac{P_v}{P_a}$$

P4PCO

Scanned by CamScanner

Subject

Date

دز نقطه شبنم $\longrightarrow P_g = P_v \longrightarrow \varphi = 100\% = 1$

$\varphi = 40\%$ ①

$\varphi = 100\%$ ②

m_{a1}

m_{v1}

m_{a2}

m_{v2}

m_{L2}

$$m_{a1} = m_{a2}$$

$$PV = mRT$$

$$m_{v1} = m_{v2} + m_{L2}$$

$$W_1 = W_2 + \frac{m_{L2}}{m_a}$$

$$\frac{m_{L2}}{m_a} = W_1 - W_2$$

تعادل انرژی:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e$$

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} - \dot{m}_{a2} h_{a2} - \dot{m}_{v2} h_{v2} - \dot{m}_{L2} h_{L2}$$

$h_{a1} \to c_p T_1$, $h_{a2} \to c_p T_2$

h_{v1}: $T_1 \xrightarrow{B.1.1} h_g$

h_{v2}: $T_2 \xrightarrow{B.1.1} h_g$

h_{L2}: $T_2 \xrightarrow{B.1.1} h_f$

PAPCO

Scanned by CamScanner